第 38 卷第 7 期 生 态 学 报 Vol.38,No.7
2018 年 4 月 ACTA ECOLOGICA SINICA Apr.,2018

DOI: 10.5846/stxb201705090854
吴燕锋, 章光新.湿地生态水文模型研究综述.生态学报,2018,38(7):2588-2598.
Wu Y F, Zhang G X.Review of development, frontiers and prospects of wetlands eco-hydrological models.Acta Ecologica Sinica,2018,38(7):2588-2598.

湿地生态水文模型研究综述

吴燕锋[1,2], 章光新[1] *
1 中国科学院东北地理与农业生态研究所,长春 130102
2 中国科学院大学,北京 100049

摘要:变化环境下湿地生态水文格局及过程发生了深刻变化,已对流域、区域乃至我国水安全和生态安全构成威胁。湿地生态水文模型是揭示湿地生态格局与生态过程的水文学机制的有效工具和重要手段。介绍了湿地生态水文模型的概念、内涵、构建方法及分类,回顾了湿地生态水文模型的国内外发展历程,论述了目前湿地生态水文模型研究应用的重点领域:湿地生态水文调控与生态补水、流域湿地生态恢复重建与水资源综合管控和气候变化下湿地生态水文变化评估与应对策略。针对目前研究中存在的问题及薄弱环节,提出未来研究的发展趋势和亟需加强研究的重点方向。

关键词:湿地; 生态水文格局; 生态水文过程; 生态水文模型; 生态水文调控

Review of development, frontiers and prospects of wetlands eco-hydrological models

WU Yanfeng[1,2], ZHANG Guangxin[1,*]
1 *Northeast Institute of Geography and Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changchun* 130102, *China*
2 *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100049, *China*

Abstract: The variability of eco-hydrological condition caused by climate change and human activities exerted a significant detrimental influence on water and ecological security in watershed region and national scale. The eco-hydrological model is an important and efficient tool for revealing interactive mechanism between ecological processes and hydrological processes. This paper reviews concept, connotation, construction methodologies and classification as well as domestic and international development of eco-hydrological models, then focuses on the key fields in the studies: ecological regulation and water resources management in wetlands, wetlands restoration and conservation and adaptive water resources management for watershed scale as well as evaluation of eco-hydrological variability under the condition of climate change and corresponding mitigation measures. Considering the problems and weakness in studies, we proposed the development trends of future research and key problems to be solved in wetland eco-hydrological models.

Key Words: wetlands; eco-hydrological patterns; eco-hydrological processes; eco-hydrological models; eco-hydrological regulation

湿地是地球上重要的天然蓄水库和物种基因库,具有涵养水源、调蓄洪水、补充地下水、调节小气候和净化水质等水文功能,在维系流域或区域水量平衡、蓄洪防旱、改善水质和维护生物多样性等方面发挥着不可替

基金项目:国家重点研发计划(2017YFC0406003);国家自然科学基金(41371108);中国科学院地学部"中国生态水文学学科发展战略"咨询项目(2017DXA)

收稿日期:2017-05-09; **网络出版日期**:2018-01-04

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhgx@ iga.ac.cn

代的作用,支撑人类的经济社会和生存环境的可持续发展[1-2]。水文过程是湿地形成、发育、演替直至消亡的最重要的驱动机制,水文情势与生物多样性构成湿地独特的生态水文特征,湿地生态系统的发展、演替以及稳定与湿地水文情势和生物多样性的长期相互作用直接相关[3-4]。在气候变化和人类活动的双重影响下,全球与流域尺度上水循环和水资源量时空分布发生了深刻变化,导致湿地面积大幅度萎缩、功能严重退化乃至丧失,影响并改变了流域水文过程及水量平衡,增加洪水和干旱频次和强度的风险,已引起国际社会和专家学者的普遍关注和高度重视。

湿地生态水文学是以湿地生态系统为研究对象,揭示不同时空尺度湿地生态格局和生态过程的水文学机制的一门科学,是研究湿地水文过程如何影响植物分布和生长及湿地植物如何影响水文过程的生态学和水文学之间的交叉学科[1]。由于缺少对湿地水文和湿地生物过程及其相互之间关系的理解,尤其是对恢复湿地未来演变动态的准确预测,往往会导致湿地生态保护与恢复重建成效甚微甚至以失败告终[5]。湿地生态水文模型是湿地生态水文学研究的核心内容之一,在理解和揭示湿地生态水文过程、机理与效应的基础上,采用数学方法和逻辑表达式,描述和模拟湿地生态水文过程及演变规律,是揭示湿地生态-水文过程相互作用关系及互馈机制、湿地生态需水量精细计算、湿地生态补水与水资源管理、变化环境下湿地生态水文响应预测以及湿地演变过程及趋势评价等研究不可或缺的有效工具。因此,湿地生态水文模型的研发及应用,可为湿地生态水文调控和水资源管理提供理论依据和技术支持,进而为湿地生态保护与恢复重建提供水文学依据,促进湿地生态水文学学科快速、健康发展。

20 世纪 70 年代以来,国内外专家开展了大量的有关湿地生态水文模型研究工作,取得了丰硕的成果。伴随着水文模型和生态模型等的发展以及计算机技术的不断提高,湿地生态水文模型已由经验性模型、机理模型、集总式模型向具有统一物理机制的分布式生态水文模型方向发展,由单过程模拟向多过程耦合模拟研究发展,更加注重水文学、生态学、湿地学、环境科学、地理信息系统和遥感技术等多学科融合和多种技术联合运用,更好地解决变化环境下湿地生态系统面临的水量和水质问题,为湿地生态系统的健康和可持续性提供水安全保障。本文首先介绍了湿地生态水文模型的概念、内涵及构建方法,然后从发展历程、研究应用的重点领域等方面综合评述湿地生态水文模型研究进展,同时指出当前存在的问题与亟需加强研究的重点方向。

1　湿地生态水文模型概述

1.1　概念及内涵

广义地讲,湿地生态水文模型就是任何可以用于描述和模拟湿地生态-水文相互作用关系、过程机理及互馈机制的数学模型。具体而言,湿地生态水文模型是在认识和揭示变化环境下湿地生态水文相互作用关系、过程机理与互馈机制的基础上(图 1),运用计算机技术,建立的模拟和预测湿地水文、土壤、植被等系统的主要构成要素之间相互作用机制及变化状况的模型,是变化环境下湿地生态系统水文影响及其响应研究的重要途径和手段。往往借助于流域水文模型、水动力模型和生态模型,针对水文与生态相互作用机理与过程开展定量模拟研究,是目前湿地生态水文模型的主要研究内容。

1.2　模型构建理论方法及分类

目前,湿地生态水文模型的构建主要包括三种方法:一是传统的数理统计法[6-7],基于长期监测数据建立生态-水文过程之间的相互关系,但这种方法对数据要求较大,同时缺乏对湿地生态-水文过程相关机理的考虑。二是遥感方法,应用 GIS 和遥感方法提取湿地生态与水文参数,结合统计分析方法、数学模型等构建生态水文模型[8]。三是数值模拟方法,目前主要包括两种方法:分别建立湿地水文模型和生态模型,并交互进行松散耦合;借助于水文、水动力或水质模型,在耦合湿地模块的基础上,完成对湿地生态水文模型的构建。但是,大多数模型的构建仍处在对生态学模型和水文学模型借鉴和综合的基础上,尚未实现湿地生态-水文过程物理机制上的紧密耦合,限制了模型的模拟精度和适用性,湿地生态水文模型的构建有待进一步发展和完善。

水文模型是湿地生态-水文相互作用关系研究和湿地生态水文模型构建的基础和前提,常常利用水文模

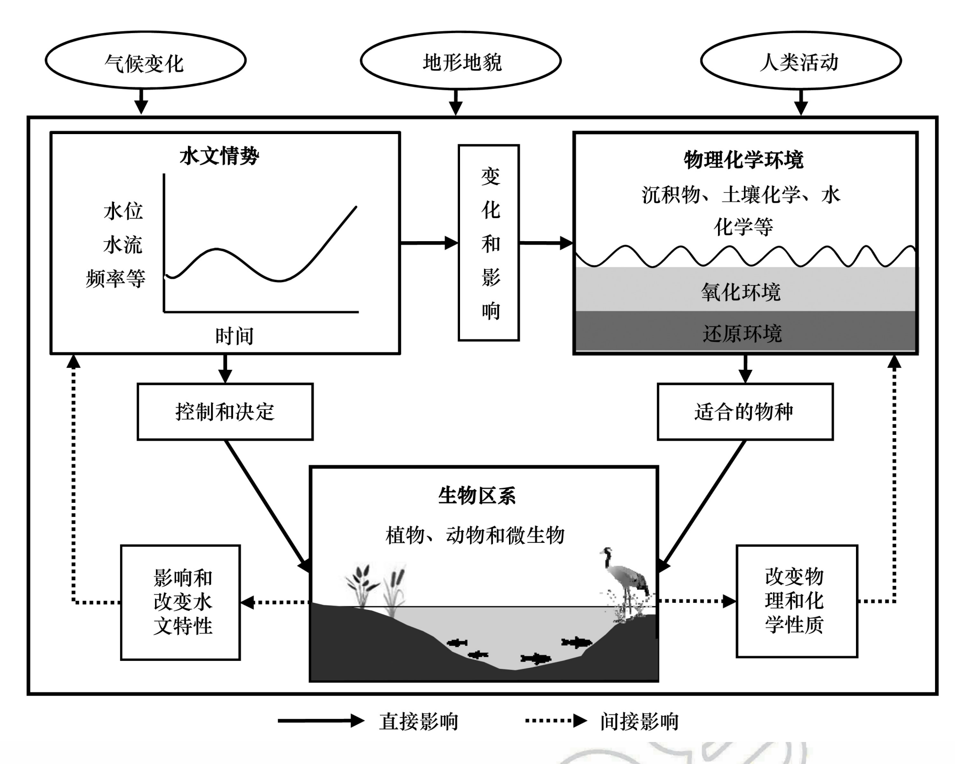


图 1 变化环境下湿地生态水文相互作用及影响反馈概念图[6]

Fig.1 System diagram of watershed wetlands eco-hydrology interaction within the context of global[6]

型模拟湿地水文情势变化状况及趋势,在此基础上明晰湿地生态水文指标与生态指标定量关系,阐释湿地生态响应的水文学机制,也可模拟不同情景下流域湿地变化的水文效应,定量评估湿地水文功能。参考水文模型分类方法[9],本文将可用于湿地水文模拟研究的水文模型归纳为 3 种类型(表 1)。

表 1 用于湿地水文模拟研究的水文模型

Table 1 Hydrological models that could be readily adapted to simulate eco-hydrological processes in wetlands

模型类型 Model types	水文模型 Hydrological model	应用领域 Applications	优缺点 Strengths and weaknesses
集总式水文模型 Lumped conceptual model	单库模型、多库模型、系统动力学方法	湿地水量平衡和水循环要素(降雨、蒸散发、地表水与地下水交互、入流及出流量等)模拟和变化研究;湿地与其他水系统的交互作用研究	所需数据量小,参数易于标定;但只能从整体上模拟湿地的水循环和水量平衡,而无法反映空间上差异性
分布式水文模型 Distributed physically-based model	MIKE、WETLANDS、WDWBM、HYDROTEL	湿地水循环过程及湿地水文功能模拟;人类活动和环境变化(土地利用、水土流失、面源污染、气候变化影响等)对湿地水文过程的影响模拟研究	模型机理性强,考虑环境要素的变化和人类活动的影响,可模拟湿地的水循环要素和水文过程;但模型复杂,数据难以获取,参数复杂,输出结果难以充分验证
半分布式水文模型 Semi-distributed physically-based model	SLURP、PRMS、SPL7、GSFLOW、VELMA、GBMM、TOPMODEL、HSPF、SWAT	湿地水循环、水文功能模拟;气候变化和人类活动对湿地的影响模拟研究	将湿地作为独特的水文响应单元,重点考虑湿地水循环过程,模拟精度高,适用性强。但所需资料过于详细,计算过程复杂,参数提取和率定繁琐

2 湿地生态水文模型的研究历程

2.1 推动湿地生态水文模型发展的重要国际会议和主要议题

随着湿地生态系统数据的获取逐渐丰富以及计算机技术的发展,国际上于 20 世纪 70 年代中期开始了淡水湿地和河口湿地浮游动物、植物与水体营养关系的模拟研究[10]。20 世纪 80 年代初期,两次以淡水湿地和浅水水体生态系统动态为主题的国际会议以及第二届世界湿地大会的召开,湿地生态水文模型研究才逐渐被

高度重视,学者们逐渐意识到建立湿地生态水文模型是湿地生态水文研究和管理的重要组成部分[11-12]。随着 20 世纪 90 年代生态水文学的兴起,召开了诸多涉及湿地生态水文模型的国际会议,并开展了一系列重要议题(表 2),极大促进了湿地生态水文模型的发展[13-15]。

表 2 关于湿地生态水文模型的重要国际会议和主要议题

Table 2 Significant researches/conferences about eco-hydrological modeling of wetlands

发展阶段 Stage of development	时间 Time	相关组织或会议 Related organizations and conferences	主要议题 Main topics
起步阶段 Infancy stage	1981 年和 1983 年	SCOPE 和 UNEP	组织了淡水湿地和浅海水域生态系统动力学国际科学研讨会
	1984 年	第二届国际湿地大会	探讨了湿地生态水文模型在淡水湿地生态系统中的应用
	1989 年	第 28 次国际地理大会	设立专题讨论湿地水文研究,出版了包含湿地生态水文模型的论文集
快速发展阶段 Stage of rapid development	1992 年	国际水和环境会议	将生态水文学作为独立学科,并将变化环境下植被与水的相互作用关系研究作为核心研究内容;探讨了湿地生态水文模型在该新学科中的作用
	1996 年	第五届国际湿地会议	发布湿地水平衡模拟研究报告;讨论了“地下水和湿地的相互影响模拟”以及新方法、新技术在湿地模拟等方面的应用
	1998 年	UNESCO/IHP-V2.3、2.4	生态水文学的专项研究会议,深入谈论了“模型尺度的探索、水文过程的生态环境效应 、水文格局的生态效应以及模拟研究”
	2000 年	2000-世纪湿地大事件活动	讨论了关于“湿地功能模拟评价”和“生态水文系统模拟研究”的问题
	2002 年	IHP 第六阶段计划	将湿地作为重要研究内容。主要目标之一:评估作为水文循环调节器的湿地的重要性;建议开展“湿地对洪涝的影响”、“湿地生态水文学研究”、“湿地地下水管理”等方面的模拟研究
	2004 年	第七届国际湿地会议	讨论了关于“洪水和洪泛平原与湿地”、“湿地环境流需求分析”和“湿地地下水-地表水的相互作用”模拟研究的问题
	2008 年	第八届国际湿地会议	围绕“气候变化对湿地的区域性和全球性影响以及湿地如何影响气候变化”讨论了湿地-气候变化相互作用模拟研究问题
	2012 年	第九届国际湿地会议	在“湿地生态系统模型与适应性管理”、“湿地水文研究和评价方法”和“径流以及水文连通性在洪泛平原和湿地中的重要性” 等专题讨论了湿地生态水文模拟和应用研究问题
	2016 年	第十届国际湿地会议	设立专题讨论了“湖沼和湿地模拟” 和“景观尺度湿地连通性的水文效应模拟”等问题

SCOPE,国际科学联合会环境问题科学委员会,Scientific Committee on Problems of the Environment;UNEP,联合国环境规划署,The United Nations Environment Program;UNESCO/IHP,联合国教科文组织国际水文计划,United Nations Educational Scientific and Cultural Organization

2.2 国内研究发展历程

中国湿地研究起步于 20 世纪 50 年代,至 20 世纪 80 年代开始了湿地生态水文模拟研究[16]。中国科学院东北地理与农业生态研究所从 20 世纪 80 年代末开始在三江平原开展沼泽湿地蒸发以及沼泽湿地对河川径流影响研究[17-18],随后探究了松嫩流域沼泽湿地与洪水过程的关系[19],但主要基于数理统计法量化生态-水文过程的关系研究。随着生态学、水文学等学科理论和方法体系的发展以及湿地生态水文研究的展开,提升了我国湿地生态水文研究水平,并逐渐与国际湿地研究接轨[16]。近 20 年来,以湿地保护与恢复对水文水资源需求为驱动,我国学者在湿地水文过程模拟及其生态效应、生态需水机理及其计算理论和方法、生态补水与水资源管理等领域开展了大量研究工作,在湿地生态水文研究理论方法、湿地水文恢复和水资源管理实践等方面取得了丰硕的成果[1]。其中,生态格局、生态过程与水文过程相互作用机制模拟研究越来越引起我国学者的关注,主要是基于生态水文模型模拟、分析和预测湿地生态-水文要素变化规律及趋势,揭示湿地系统

的内在结构和外在环境的动态变化的关系,定量评价湿地开发活动带来的生态环境影响[3-4],并提出面向湿地恢复和保护的流域水资源优化配置和综合管控技术。具体而言,学者们主要围绕湿地水文与水动力[20-22]、湿地水文与生态演变[23]、湿地生态需水[24]、湿地水文功能[25-27]、气候变化对湿地的影响[28]以及湿地恢复重建与水文调控[29-30]等主题开展相关研究工作(表 3),对我国湿地生态水文学的发展、湿地生态保护与恢复重建等方面具有重要意义。

表 3 近年来我国湿地生态水文模拟研究

Table 3 Researches about wetlands eco-hydrological modeling in China

作者和年份 Authors and year	水文模型 Hydrological models	主要研究内容 Main research contents
冯媛,2016[22]	MIKE 和 WASP 模型	湿地二维水动力模拟和一维水质模拟
宋文彬等,2014[27] 冯夏清,2016[21]	改进的 SWAT 模型	湿地水文过程、水文功能模拟与评估
林波, 2013[28]	MIKE SHE/MIKE 11 模型	未来气候变化对流域湿地水文情势的影响模拟
李红艳等,2012[25]	水动力水质耦合模型(WASP)	湿地水质净化功能模拟与评估
罗先香等,2011[30]	基于生态过程、水文过程和能量过程模块构建的生态水文耦合模型	河口湿地生态水文模拟与调控
焦璀玲等,2010[26]	MIKE21 模型	湿地二维水动力水质模拟
黄翀等,2010[29]	水文模型 SOBEK 和地下水模型 Visual Modflow	不同补水预案下湿地水文过程模拟
胡东来,2009[23]	WEP 和 DSSAT 模型耦合	流域水循环与湿地生态演变的耦合作用模拟
刘大庆,2008[24]	半分布式湿地水循环模型	寒区沼泽湿地水循环过程时空变化模拟和需水量预测
贾忠华等,2007[20]	DRAINMOD 模型	河道水位变化对河滩湿地水文过程的影响模拟

2.3 向基于机理机制的"多要素、多尺度、多过程"综合模型发展

由于尚未建立具有普遍适用性的湿地生态水文模型,学者们主要基于现有的水文模型或生态模型,修改或增加相应的湿地模块,并应用于湿地生态水文过程模拟和分析研究。其中,主流的耦合湿地模块的流域水文模型及其主要应用见表 4[21,26-28,31-41]。随着湿地模块的不断开发和改进以及水循环模拟技术和生态模拟技术的进一步耦合,湿地生态水文模型已从描述单一过程关系经验模型发展到精细刻画物理过程的分布式水文-水动力-水质-生态耦合响应的综合模型。研究历程上,湿地生态水文模型经历了水文与动物、植被和生境等响应关系研究、水文-生态过程模拟研究发展为水动力-水质-生态过程综合研究;由水文情势指标与生态指标之间关系的定性或定量研究逐渐发展为基于生态过程和水文过程的定量研究;由单一过程的影响和响应关

表 4 耦合湿地模块的流域水文模型

Table 4 Watershed hydrological models coupled with wetland modules

作者和年份 Authors and year	水文模型 Hydrological models	主要研究内容 Main research contents
Acreman 和 Holden, 2013[31];林波, 2013[28];Karim 等, 2012[33];焦璀玲等, 2010[26]	MIKE SHE、FLOOD、11/NAM	湿地水文机制变化;湿地对水文过程(径流、基流、蒸散发、地下水等)的影响;地表水地下水交互作用
冯夏清, 2016[21];宋文彬等, 2014[27];Martinez-Martinez 等, 2014[34];Feng 等, 2013[35];Liu 等, 2008[36];Wang 等, 2008[37]	改进的 SWAT 模型	湿地水文过程模拟与评价;流域湿地与地表水、地下水系统水文连通性和交互作用;湿地对流域水量、水质以及泥沙沉积的影响;湿地退化/重建的水文效应
Fossey 和 Rousseau, 2016[38-39];Fossey 等 2015 和 2016[40-41]	PHYSITEL/HYDROTEL 模型平台	湿地水文模拟、评价与预测;湿地水文功能模拟(削减洪峰、维持基流等);气候变化对湿地水文功能的影响

系研究逐渐发展为多过程、多时空尺度及耦合机制研究;由注重湿地生态效应和生态功能的评价和预测研究发展到更加关注湿地水系统、生态环境系统与社会经济系统之间的相互作用机制,从“人-水-湿地”和谐论和生态经济角度考虑湿地生态水文功能恢复和保护以及水资源综合管控,将极大提高湿地生态有效修复和保护。

3 湿地生态水文模型研究应用的重点领域及案例

3.1 湿地生态水文调控与生态补水

在利用湿地生态水文模型理解和揭示湿地水文过程变化的生态响应机制的基础上,确定维持湿地生态系统健康的合理的水文情势(生态水位、生态流量、水面面积和水文周期等),精细计算湿地生态需水量,为湿地生态水文调控与生态补水提供科学依据和技术支持,从而有助于流域尺度上科学地进行生态配水和水资源管控[42]。首先基于水文循环与水量平衡原理、生态系统完整性以及水文过程的生态效应等生态水文理论基础,在明晰生态水文耦合作用机制的基础上,构建湿地生态-水文定量模拟模型,通过人为设定湿地生态水文目标和多个环境变化情景,利用模型对多情景下湿地生态环境效益进行评价,最终确定维持湿地生态功能的生态需水量,并将湿地生态需水评估结果落实到生态补水实践中。崔丽娟等[43]在定量揭示扎龙湿地逐年平均适宜生态需水量的基础上,提出了洪水资源人工补水和加强水源的优化配置等湿地补水措施。孙爽等[44]在综合分析查干湖湿地最高水位、最大蓄水量、水面面积和湖面蒸散量等水文要素的基础上,以满足鱼类繁殖的最低要求、保障湿地内适宜的芦苇面积以及群落结构完整性作为生态保护目标,计算了查干湖湿地适宜生态水位和生态需水量,并提出了不同情景查干湖生态水量调控方案和不同农田退水量情景生态需水量调控方案。但是,湿地生态水文调控不仅要解决“水少”的问题(如何补水),还要解决“水多”的问题(如何排水),这就需要在确定和量化水文、水质和生态保护目标的基础上,开展多情景下面向湿地保护目标的生态水文调控技术与应用研究。如何基于湿地水资源需求与生态水文调控,从根本上解决湿地生态安全问题,实现水资源在社会经济系统和湿地生态系统之间的优化配置,是目前亟需解决的问题。

随着湿地修复工作的深入开展,面向湿地生态的水资源合理配置已逐步得到重视,并为解决湿地缺水问题提供了很好的思路[1,45]。然而,目前学者们主要集中在湿地生态需水量的估算以及生态补水方面[46-48],如何与湿地生态补水相结合,切实考虑湿地生态水文特征,充分利用非常规水资源(洪水资源和农田退水等),以最大限度发挥湿地水文调蓄和水质净化等功能的湿地水资源调控技术是当前关注的焦点和研究的难点之一,也可为湿地修复重建提供理论和技术支撑。

3.2 流域湿地生态恢复重建与水资源综合管控

流域湿地生态水文过程模拟是基于水量平衡原理,依据湿地内部地形、土壤和生境等的差异,建立模拟湿地内部水循环过程的湿地模块并耦合到流域水文模型中,形成综合的流域湿地水文模型,并用于流域湿地生态过程和生态格局与水文过程的相互作用机制和反馈的研究。流域湿地生态水文过程模拟不仅可以精确地模拟湿地水循环过程,同时把湿地水循环过程纳入流域单元内,考虑湿地与周围环境密切的水文关系,并能揭示气候变化和人类活动影响下的湿地水文响应机理,模拟和预测流域湿地水文情势,为流域湿地水文管理和水资源合理配置提供科学依据[1]。

3.2.1 湿地生态恢复重建的水文效应模拟研究

湿地具有强大的水循环调节功能,湿地变化会引起其水文服务和水文功能的变化。学者们主要从湿地生态格局变化、湿地生态退化和恢复重建等角度开展湿地变化的水文效应模拟研究。基于湿地多时空变化情景模拟研究表明,湿地季节性变化[40-41]、湿地恢复和重建程度[34]和农业开垦[49]以及气候变化[50]等会引起其生态格局改变,进而引起其水文调蓄能力、水质净化能力等的变化。如 19802008 年 Cole Greek 流域 60%的湿地消失导致流域 2 年、5 年和 10 年一遇的洪水发生概率增加了 15%[51]。Yang 等[52]将河滨湿地模块耦合 SWAT 模型构建了流域湿地水文模型,探讨了加拿大黑河流域河滨湿地损失和重建对水质(总氮、总磷、沉积物)的

影响,结果表明:与现有湿地状况比较,河滨湿地完全丧失会引起水质严重恶化,而河滨湿地完全恢复会引起水质明显改善。

面对湿地恢复和保护的现实需求,尤其是有限的水资源和土地资源等现实问题,如何以最优的湿地空间布局达到最大的湿地水文功能的发挥,是湿地恢复和重建亟待解决的一个学科前沿问题。学者们主要通过以下两方面开展研究:(1)基于历史湿地情景(恢复至历史某一时期)的水文模拟,对比分析目前湿地情景和历史某时段情境下湿地水文功能的差异性;(2)基于现有湿地分布和重建选址分析,运用优化算法(如遗传算法)和目标函数(如最大洪峰削减、最低投入和维护成本、最大景观尺度水文连通性等),模拟多个湿地保护和重建情景下湿地水文情势和流域水文过程,确定湿地位置和面积大小等最优生态格局。但是,由于重建观念和技术方法存在分歧,尤其是湿地重建及其评价标准存在的分歧,湿地恢复和重建的水文模拟研究仍存在亟待解决的问题,如基于最优湿地生态格局的综合模拟研究如何验证,以及如何将气候变化耦合湿地恢复和保护目标,从提高湿地恢复和保护方案的可行性。

3.2.2 湿地水文功能模拟与水资源管控研究

流域尺度上,湿地通过地表径流、近地表径流、地下径流等方式与河川径流、湖泊以及其他水域等地表水系统连通,发挥其水文调节和净化水质等功能,一方面影响湿地生物多样性和分布以及湿地生态格局[53],另一方面以水为媒介影响流域下游的水文过程和生态过程[54-55](图 2)。Evenson 等[49]基于 SWAT 模型定量评价了 Nahunta 河流域孤立湿地对下游水文的累积影响效应,认为孤立湿地可以调节洪峰流量和基流量,且孤立湿地的景观状况影响流域水量平衡。Golden 等[53]基于空间径流网络模型和 SWAT 模型在美国北卡罗来纳州的 Neuse 河 579 个子流域开展径流模拟研究表明,孤立湿地以及流域整体的湿地景观生态格局共同影响径流的季节性变化。在研究思路上,分别评价流域有/无湿地情景、不同湿地类型情景下流域水文过程的变化,如从水量平衡要素(径流量、基流量、潜在蒸散发、地面径流和地下水补给量等)[49]、洪水强度、频率、重现期变化和下游水动力参数(河道径流、水位和流速等)[56]、泥沙沉积[34]和水质指标[57]等角度探讨湿地变化的水文效应,定量评估湿地在流域尺度上的水文功能(图 3)。

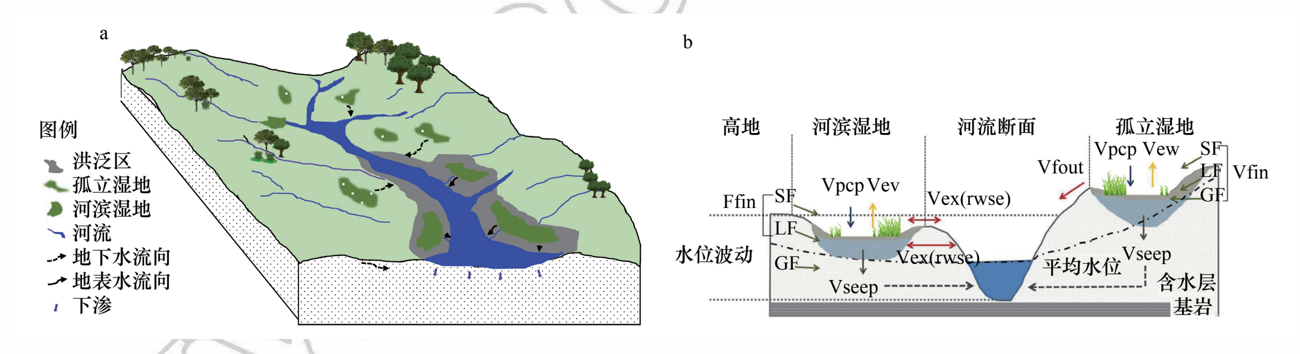


图 2 流域水文连通性概念模型

Fig.2 Conceptual model of hydrological connectivity in a watershed

a. 流域不同湿地类型水文连通性概念图;b. 孤立湿地与河滨湿地水文连通剖面图[40];SF:地表径流,Surface flow;LF:侧向流,Lateral flow;GF:地下径流,Groundwater flow;Vev:蒸散发,Evapotranspiration;Vpcp:降雨量,Precipitation;Vseep:渗漏量,Seepage;Vflout:孤立湿地出流量,Isolated water surface outflow;Vex(rwse):河滨湿地地表水交换量,Riparian water surface exchange;Vex(rwle):河滨湿地侧向水体交换量,Riparian water lateral exchange

但是,由于湿地的类型和位置[39-40]、所处流域的水系级别[41]、植被覆盖类型和空间格局[58]以及生态系统[59]的不同,其调蓄水量尤其是调蓄洪水的能力以及净化水质能力也有所不同。孤立湿地和河滨湿地作为流域湿地重要组成部分,两者共同发挥水文功能,影响并改变着流域水文过程,已成为近年来学者们关注的焦点之一。孤立湿地是指具有或少有永久性水面,与河流无地表连通性或连通性较差的湿地,其水文状况受地下水位影响很大,且蒸散发、降水量和湿地自身特性影响地下水位变化[60];河滨湿地是指临近河流遭受洪水周期性淹没的湿地,其水文状况主要取决于河流的影响程度和地下水状况(图 2)[38]。Fossey 等[41]基于耦合

孤立湿地和河滨湿地模块的分布式水文模型 HYDROTEL,运用湿地位置-类型指数探究了 Becancour 河流域孤立湿地和滨河湿地对径流的影响和作用,认为上游、中游和下游的孤立湿地和河滨湿地对年和季节洪峰流量和平均流量的影响差异显著,且湿地所处的流域水系级别不同,其调蓄洪峰流量的能力也有所不同。Acreman 和 Holdeh[31] 认为流域上游高地雨养型湿地往往是洪水的发源地,而下游洪泛湿地具有调蓄洪水的能力。其次,气候变化和水资源调控会改变径流机制,进而改变湿地水源和湿地水文情势,影响湿地水文效应及水文功能的发挥[38-39,57]。因此,鉴于湿地生态过程和水文过程的复杂性以及气候变化和人类活动的共同影响,增加了湿地水文功能模拟的复杂性,需要结合多学科、多技术手段,从而提高模型的模拟精度,在揭示流域湿地水文功能的基础上,提出切实可行的湿地生态恢复重建与水资源综合管控方案。

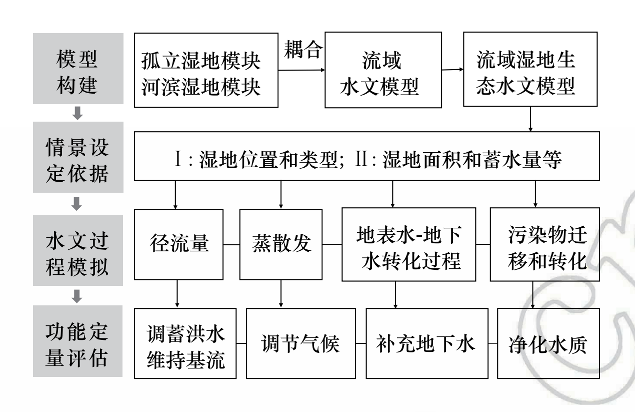


图 3　湿地水文功能定量评估研究思路

Fig. 3　Research methodology of quantitative assessment of wetlands hydrological functions

3.3　气候变化下湿地生态水文变化评估与应对策略

气候变化通过改变全球水文循环的现状而引起水热资源在时空上的重新分布以及极端水文事件发生频发和强度增大,影响湿地水文水资源和关键水文过程以及湿地水文与生态的相互作用过程,对湿地生态系统的结构和功能产生深远的影响[47,61-64]。基于气候驱动的过程模型[65-68]或大尺度流域水文模型[69-70],学者们研究表明,湿地对气候变化极为敏感,气候变化引起的湿地关键水文要素的变化(如积雪和径流减少,蒸散发增加等)将会导致湿地水位下降、水文周期缩短、干旱化增强,最终引起湿地面积的萎缩提前和加剧以及水禽栖息地的减少。如 Werner 等[68]认为 20 世纪气候变化引起北美大草原湿地景观演变,表现为湿地水文周期缩短和植被循环周期延长,最终引起了数百个依赖湿地生存的物种的生产力减少。Johnson 等[66]基于气候驱动的 WETLANDSCAPE 模型和 19 个气象站数据的模拟研究表明气温增加 1.52.0℃会导致北美大草原湿地功能的消失。Leel 等[69]基于湿地实测水位数据和 VIC 模型模拟的土壤含水量数据,建立了土壤含水量与湿地水位的回归模型,模拟美国西北部种山地湿地(间歇性、季节性、多年存在的和永久性湿地)的水文特征并预测了未来气候变化变化对湿地水文特征的影响,认为未来气候变化引起的湿地干旱化会导致不同类型的湿地面积增减、转化甚至消失殆尽。

研究方法上,学者们主要基于气候数据和气候驱动生态水文模型开展气候变化对湿地水文和植被覆盖等影响的模拟研究,而基于长期野外实测地表水和地下水等数据并结合气候数据开展湿地模拟的研究较少。研究思路上,通过设定不同的气温和降水组合情景或基于未来气候情景模式数据或不同研究时段,模拟不同干湿情境下或不同时段湿地水文情势和面积、植被覆盖的响应程度和栖息地的变化等,揭示气候变化驱动下的湿地演变特征,并提出应对策略和方案[1]。

纵观国内外有关气候变化情境下湿地生态水文变化评估与应对策略的研究,学者们主要围绕气候因子变化与湿地生态水文要素之间的相互作用过程和机理开展相关研究,基于气候变量-水文过程-湿地生态响应耦合模型,揭示不同气候情境下的水文情势变化以及生态过程和生态格局演变趋势,并提出应对气候变化的水资源调控和湿地恢复和保护的管理方案。但是,湿地的退化往往离不开人类活动的强烈干扰,尤其是具有较强农业活动的地区;其次,大尺度湿地气候、水文等要素有明显空间差异性,这就会引起湿地对气候变化的响应在空间上有所不同。如 Fay 等[71]基于 63 个气温和降水组合情境模拟研究表明,气候变化对湿地的影响不可一概而论,对湿地的保护需要考虑气候变化引起的不同地区干旱程度的差异性。Johnson 等[67]研究表明北美大草原湿地对气候变化的响应也有空间差异性,即气温不同的地区,湿地的植被状况对同等增温情景的响应差异明显。因此,开展气候变化对湿地生态水文的影响及其应对策略研究,需要综合考虑环境变化和人为

干扰对湿地生态水文的影响,并基于气候模式和水文模型开展相关模拟和预测研究,从而更好的服务于区域或流域湿地生态安全和农业安全。

4 结论与展望

综合分析国内外湿地生态水文模型研究现状和发展态势,湿地生态水文模型取得了丰硕的成果,并向"多要素、多尺度、多过程"的复杂模型发展,在湿地生态水文调控与生态补水、流域湿地生态恢复重建与水资源综合管控和气候变化下湿地生态水文变化评估与应对策略等领域应用中发挥着重要作用。但是,目前仍缺乏普遍适用性的湿地生态水文模型,且基于水文模型和生态模型或模块的耦合而建立湿地生态水文模型存在不足,如分离模拟和松散耦合的方式导致模型间的数据无法进行实时传递,尚未实现湿地生态-水文过程物理机制上的紧密耦合,影响模拟的精度和研究的适用性;其次,在模型应用研究中,多集中于单向作用的研究,例如水文过程对湿地演变的影响、湿地变化对水文过程的影响,有关流域湿地生态格局和生态过程与水文过程双向交互作用和耦合机制的研究较少,更缺乏综合考虑气候变化、人类活动及湿地特性等多要素的综合模拟和预测研究。为进一步推进湿地生态水文模型开展深入、全面、系统的研究,综合已有研究,针对目前研究中存在的一些问题,提出以下几方面建议与展望:

(1)机理研究:加强变化环境下流域水循环及其伴生过程对湿地生态的影响及其反馈机制研究。从湿地生态系统尺度研究水量、水质变化及其交互作用对生态系统的影响机理,从流域尺度开展水文过程与湿地水文响应耦合关系研究,精细化计算湿地生态需水量和生态补水量,为流域湿地水文调控与水资源管理提供支撑。

(2)模型研发:加强湿地模块研发及其与流域水文模型的耦合研究。在全面、深入理解和刻画湿地水文特性及其与周围环境的水文联系的基础上,研发不同类型湿地模块,并将湿地模块嵌入到流域水文模型中,构建流域湿地生态水文模型,提高水文模拟精度,并为流域湿地恢复保护与重建和湿地景观格局优化提供依据和决策支持。

(3)模型应用: 加强湿地生态水文模型与生态经济模型耦合和应用研究。从生态水文学和生态经济学研究的理论入手,拓展湿地水资源综合管理的理念和方法,构建湿地"水-生态-经济"协调发展耦合模型,指导湿地水资源管理与生态恢复保护,更好的服务于生态文明建设。

参考文献(References):

[1] 章光新, 张蕾, 冯夏清, 范伟, 董李勤. 湿地生态水文与水资源管理. 北京: 科学出版社, 2014: 4-7.
[2] Bullock A, Acreman M. The role of wetlands in the hydrological cycle. Hydrology and Earth System Sciences, 2003, 7(3): 358-389.
[3] 陈敏建, 王立群, 丰华丽, 戴向前, 黄昌硕, 王高旭. 湿地生态水文结构理论与分析. 生态学报, 2008, 28(6): 2887-2893.
[4] 王育礼, 王烜, 孙涛. 湿地生态水文模型研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(10): 1753-1762.
[5] Richardson C J, Reiss P, Hussain N A, Alwash A J, Pool D J. The restoration potential of the Mesopotamian marshes of Iraq. Science, 2005, 307(5713): 1307-1311.
[6] Peters J. Ecohydrology of wetlands: monitoring and modelling interactions between groundwater, soil and vegetation [D]. Ghent, Belgium: Ghent University, 2008.
[7] 周德民, 宫辉力, 胡金明, 赵魁义. 湿地水文生态学模型的理论与方法. 生态学杂志, 2007, 26(1): 108-114.
[8] 胡胜杰, 牛振国, 张海英, 陈燕芬, 宫宁. 中国潜在湿地分布的模拟. 科学通报, 2015, 60(33): 3251-3262.
[9] 陈仁升, 康尔泗, 杨建平, 张济世. 水文模型研究综述. 中国沙漠, 2003, 23(3): 221-229.
[10] Patten B C, Mulholland R J, Gowdy C M. Systems analysis and simulation in ecology. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, 1978, 8(10): 779-779.
[11] Logofet D O, Luckyanov N K. Ecosystem Dynamics in Freshwater Wetlands and Shallow Water Bodies. Moscow: Centre of International Projects GKNT Moscow, 1982: 12.
[12] Mitsch W J. Ecological models for management of freshwater wetlands // Jørgensen S E, Mitsch W J, eds. Application of Ecological Modelling in Environmental Management, Part B. Amsterdam: Elsevier, 1983: 283-310.

[13] 杨永兴. 国际湿地科学研究进展和中国湿地科学研究优先领域与展望. 地球科学进展, 2002, 17(4): 508-514.

[14] 杨永兴. 从魁北克 2000—世纪湿地大事件活动看 21 世纪国际湿地科学研究的热点与前沿. 地理科学, 2002, 22(2): 150-155.

[15] 杨永兴. 国际湿地科学研究的主要特点、进展与展望. 地理科学进展, 2002, 21(2): 111-120.

[16] 孙广友. 中国湿地科学的进展与展望. 地球科学进展, 2000, 15(6): 666-672.

[17] 陈刚起. 三江平原沼泽径流的实验研究//黄锡畴. 中国沼泽研究. 北京: 科学出版社, 1988: 120-126.

[18] 陈刚起, 吕宪国, 杨青, 王毅勇. 三江平原沼泽蒸发研究. 地理科学, 1993, 13(3): 220-226.

[19] Lu X G, Zhang W H. The flood of the Nenjiang River and the Songhua River in 1998 and the comprehensive management of the River Basins. Chinese Geography Sciences, 1999, 9(3): 193-198.

[20] 贾忠华, 罗纨, 江彩萍, 王庆永. 半湿润地区河滩湿地水文特性的模拟研究. 水利学报, 2007, 38(4): 454-459, 467-467.

[21] 冯夏清. 基于改进的 SWAT 模型的湿地水文过程模拟. 水电能源科学, 2016, 34(1): 19-22, 65-65.

[22] 冯媛. 表面流人工湿地水动力-水质模拟与分析[D]. 济南: 山东大学, 2016.

[23] 胡东来. 嫩江流域水循环与湿地生态演变相互作用及综合调控[D]. 上海: 东华大学, 2009.

[24] 刘大庆. 基于水循环模拟的沼泽湿地生态需水研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2008.

[25] 李红艳, 章光新, 孙广志. 基于水量-水质耦合模型的扎龙湿地水质净化功能模拟与评估. 中国科学: 技术科学, 2012, 42(10): 1163-1171.

[26] 焦璀玲, 王昊, 李永顺, 翟雯. 人工湿地在水环境改善方面的应用. 南水北调与水利科技, 2010, 8(2): 83-86.

[27] 宋文彬, 谢先红, 徐婷, 王超, 周德民. 洪河沼泽湿地水文过程模型构建及水文功能分析. 湿地科学, 2014, 12(5): 544-551.

[28] 林波. 三江平原挠力河流域湿地生态系统水文过程模拟研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2013.

[29] 黄翀, 刘高焕, 王新功, 葛雷, 范晓梅, 王瑞玲, 单凯. 不同补水条件下黄河三角洲湿地恢复情景模拟. 地理研究, 2010, 29(11): 2026-2034.

[30] 罗先香, 张蕊, 严登华. 辽宁双台子河口湿地生态水文模拟与调控. 地理研究, 2011, 30(6): 1089-1100.

[31] Acreman M, Holden J. How wetlands affect floods. Wetlands, 2013, 33(5): 773-786.

[32] Haghighi A T, Kløve B. Design of environmental flow regimes to maintain lakes and wetlands in regions with high seasonal irrigation demand. Ecological Engineering, 2017, 100: 120-129.

[33] Karim F, Kinsey-Henderson A, Wallace J, Arthington A H, Pearson R G. Modelling wetland connectivity during overbank flooding in a tropical floodplain in north Queensland, Australia. Hydrological Processes, 2012, 26(18): 2710-2723.

[34] Martinez-Martinez E, Nejadhashemi A P, Woznicki S A, Love B J. Modeling the hydrological significance of wetland restoration scenarios. Journal of Environmental Management, 2014, 133: 121-134.

[35] Feng X Q, Zhang G X, Xu Y J. Simulation of hydrological processes in the Zhalong wetland within a river basin, Northeast China. Hydrology and Earth System Sciences, 2013, 17(7): 2797-2807.

[36] Liu Y B, Yang W H, Wang X X. Development of a SWAT extension module to simulate riparian wetland hydrologic processes at a watershed scale. Hydrological Processes, 2008, 22(16): 2901-2915.

[37] Wang X X, Yang W H, Melesse A M. Using hydrologic equivalent wetland concept within SWAT to estimate streamflow in watersheds with numerous wetlands. Transactions of American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2008, 51(1): 55-72.

[38] Fossey M, Rousseau A N. Can isolated and riparian wetlands mitigate the impact of climate change on watershed hydrology? A case study approach. Journal of Environmental Management, 2016, 184: 327-339.

[39] Fossey M, Rousseau A N. Assessing the long-term hydrological services provided by wetlands under changing climate conditions: a case study approach of a Canadian watershed. Journal of Hydrology, 2016, 541: 1287-1302.

[40] Fossey M, Rousseau A N, Bensalma F, Savary S, Royer A. Integrating isolated and riparian wetland modules in the PHYSITEL/HYDROTEL modelling platform: model performance and diagnosis. Hydrological Processes, 2015, 29(22): 4683-4702.

[41] Fossey M, Rousseau A N, Savary S. Assessment of the impact of spatio-temporal attributes of wetlands on stream flows using a hydrological modelling framework: a theoretical case study of a watershed under temperate climatic conditions. Hydrological Processes, 2016, 30(11): 1768-1781.

[42] 冯夏清, 章光新. 湿地生态需水研究进展. 生态学杂志, 2008, 27(12): 2228-2234.

[43] 崔丽娟, 鲍达明, 肖红, 张曼胤, 何春光. 扎龙湿地生态需水分析及补水对策. 东北师大学报: 自然科学版, 2006, 38(3): 128-132.

[44] 孙爽. 查干湖湿地水文情势与生态需水调控研究[D]. 长春: 中国科学院研究生院(东北地理与农业生态研究所), 2014.

[45] 杨志峰, 崔保山, 孙涛, 陈贺, 杨薇. 湿地生态需水机理、模型和配置. 北京: 科学出版社, 2012: 21-22.

[46] Ye Z X, Li W H, Chen Y N, Qiu J J, Aji D. Investigation of the safety threshold of eco-environmental water demands for the Bosten Lake wetlands, western China. Quaternary International, 2017, 440: 130-136.

[47] 董李勤，章光新，张昆．嫩江流域湿地生态需水量分析与预估．生态学报，2015，35(18)：6165-6172.
[48] 严登华，何岩，王浩，秦大庸，王建华．生态水文过程对水环境影响研究述评．水科学进展，2005，16(5)：747-752.
[49] Evenson G R，Golden H E，Lane C R，D'Amico E. Geographically isolated wetlands and watershed hydrology：a modified model analysis. Journal of Hydrology，2015，529：240-256.
[50] Schneider C，Flörke M，De Stefano L，Petersen-Perlman J D. Hydrological threats to riparian wetlands of international importance – a global quantitative and qualitative analysis. Hydrology and Earth System Sciences，2017，21(6)：2799-2815.
[51] Duncan B R. The Impact of Palustrine Wetland Loss on Flood Peaks：An Application of Distributed Hydrologic Modeling in Harris County，Texas [D]. Houston，Texas：Rice University，2011.
[52] Yang W H，Liu Y B，Ou C P，Gabor S. Examining water quality effects of riparian wetland loss and restoration scenarios in a southern Ontario watershed. Journal of Environmental Management，2016，174：26-34.
[53] Golden H E，Sander H A，Lane C R，Zhao C，Price K，D'Amico E，Christensen J R. Relative effects of geographically isolated wetlands on streamflow：a watershed-scale analysis. Ecohydrology，2016，9(1)：21-38.
[54] Cohen M J，Creed I F，Alexander L，Basu N B，Calhoun A J K，Craft C，D'Amico E，DeKeyser E，Fowler L，Golden H E，Jawitz J W，Kalla P，Kirkman L K，Lane C R，Lang M，Leibowitz S G，Lewis D B，Marton J，McLaughlin D L，Mushet D M，Raanan-Kiperwas H，Rains M C，Smith L，Walls S C. Do geographically isolated wetlands influence landscape functions? Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America，2016，113(8)：1978-1986.
[55] 崔保山，蔡燕子，谢湉，宁中华，华妍妍．湿地水文连通的生态效应研究进展及发展趋势．北京师范大学学报：自然科学版，2016，52(6)：738-746.
[56] Ahmed F. Influence of wetlands on black-creek hydraulics. Journal of Hydrologic Engineering，2017，22(1)：D5016001.
[57] Daggupati P，Srinivasan R，Dile Y T，Verma D. Reconstructing the historical water regime of the contributing basins to the Hawizeh marsh：implications of water control structures. Science of the Total Environment，2017，580：832-845.
[58] MirosławŚwiątek D，Szporak-Wasilewska S，Grygoruk M. Assessing floodplain porosity for accurate quantification of water retention capacity of near-natural riparian ecosystems—A case study of the Lower Biebrza Basin，Poland. Ecological Engineering，2016，92：181-189.
[59] McLaughlin D L，Cohen M J. Realizing ecosystem services：wetland hydrologic function along a gradient of ecosystem condition. Ecological Applications，2013，23(7)：1619-1631.
[60] Tiner R W. Geographically isolated wetlands of the United States. Wetlands，2003，23(3)：494-516.
[61] 董李勤，章光新．全球气候变化对湿地生态水文的影响研究综述．水科学进展，2011，22(3)：429-436.
[62] Gilliam J W. Riparian wetlands and water quality. Journal of Environmental Quality，1994，23(5)：896-900.
[63] 宋长春．湿地生态系统对气候变化的响应．湿地科学，2003，1(2)：122-127.
[64] 李峰平，章光新，董李勤．气候变化对水循环与水资源的影响研究综述．地理科学，2013，33(4)：457-464.
[65] Johnson W C，Werner B，Guntenspergen G R，Voldseth R A，Millett B，Naugle D E，Tulbure M，Carroll R W H，Tracy J，Olawsky C. Prairie wetland complexes as landscape functional units in a changing climate. BioScience，2010，60(2)：128-140.
[66] Johnson W C，Werner B，Guntenspergen G R. Non-linear responses of glaciated prairie wetlands to climate warming. Climatic Change，2016，134(1/2)：209-223.
[67] Johnson W C，Poiani K A. Climate change effects on prairie pothole wetlands：findings from a twenty-five year numerical modeling project. Wetlands，2016，36(S2)：273-285.
[68] Werner B A，Johnson W C，Guntenspergen G R. Evidence for 20th century climate warming and wetland drying in the North American Prairie Pothole Region. Ecology and Evolution，2013，3(10)：3471-3482.
[69] Lee S Y，Ryan M E，Hamlet A F，Palen W J，Lawler J J，Halabisky M. Projecting the hydrologic impacts of climate change on Montane Wetlands. PLoS One，2015，10(9)：e0136385.
[70] McIntyre N E，Wright C K，Swain S，Hayhoe K，Liu G，Schwartz F W，Henebry G M. Climate forcing of wetland landscape connectivity in the Great Plains. Frontiers in Ecology and the Environment，2014，12(1)：59-64.
[71] Fay P A，Guntenspergen G R，Olker J H，Johnson W C. Climate change impacts on freshwater wetland hydrology and vegetation cover cycling along a regional aridity gradient. Ecosphere，2016，7(10)：e01504.